

## TAE Kolloquium

**Das neue Auto - elektrisch, automatisiert, vernetzt**

## KOMMERZIALISIERUNG DER WASSERSTOFF TECHNOLOGIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Ulrich Bünge (LBST), Frieder Borggreffe, Johannes Pagenkopf (DLR),  
Dr. Stephan Schmid (DLR), Vortrag und Co-Autor

KOMMEN IN DER  
ZUKUNFT

H<sub>2</sub>-WASSERSTOFF-TANKSTELLE

# Auftraggeber, Projektziele

## ■ Auftraggeber

- Ministerium für Umwelt, Klimaschutz und Energie
- Ministerium für Finanzen und Wirtschaft
- Ministerium für Transport und Infrastruktur
- e-mobil Baden Württemberg, Cluster Brennstoffzelle

## ■ Studienziele, Analysen zur ...

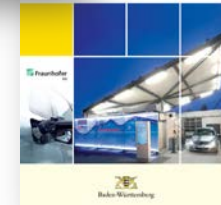
- Implementierung von Wasserstoff in verschiedenen Märkten (Verkehr, Industrie, Strom- & Erdgasnetz), Fokus auf erneuerbarer Herstellung und bestehenden Infrastrukturen
- Wirtschaftliche Randbedingungen sowie strukturelle und ökologische Wirkungen
- Handlungsempfehlungen für industrielle und politische Maßnahmen



Rolle im Energiesystem  
(6/2014)



Infrastruktur  
(3/2013)



Einsatzpotenziale  
(2012)



# Projektteam

## Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)

- Projektkoordination
- Wasserstoff-Marktanalyse
- Wirtschaftlichkeitsanalysen
- Wasserstoff-Infrastrukturanalysen
- Handlungsempfehlungen



ludwig bölkow  
systemtechnik

## Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / Institut für Technische Thermodynamik (DLR-TT)

- Energiesystemmodellierung und Szenariodefinition
- Wirkungsanalysen (Wasserstoff, Erneuerbare Energien, Stromnetz)
- Handlungsempfehlungen



Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt

## Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)

- Marktanalysen BZ-Fzg.
- Szenariodefinition Mobilität und Bestandsabschätzungen
- Fördermaßnahmen
- Handlungsempfehlungen

# Übersicht

- Wasserstoff-Nachfrage in Baden-Württemberg
  - Schwerpunkt Mobilität, Industrie, Gasnetz
- Einsatz erneuerbaren Stromes zur Wasserstoff-Bereitstellung
  - Stromproduktion, CO<sub>2</sub>-Emissionen, „Überschussstrom“
  - zeitlich aufgelöste Simulation, Elektrolyseur-Einsatz
- Wirtschaftlichkeitsaspekte
  - Wasserstoffbereitstellung, Betankungsinfrastruktur

# Wasserstoff-Anwendungen in der Mobilität in BaWü

## Analyse der Wasserstoffnachfrage in der Mobilität bis 2030

- **Ziel:** Abschätzung BZ-Fahrzeugbestand & H<sub>2</sub>-Bedarf im Verkehr
- **Vorgehen:**



- **Untersuchungsraum:**
  - 2020 und 2030
  - Straßen- und Schienenfahrzeuge



# Marktüberblick BZ-Fahrzeuge

## Pkw

- **wenige seriennahe Modelle:**  
*Hyundai ix35, Toyota Mirai, Honda Clarity, Daimler B-Klasse F-Cell*
- Einsatz ab Mittelklasse
- (noch) geringe Stückzahlen, hohe Preise
- einige neue Modelle angekündigt:  
*Daimler GLC (2017), BMW (>2020), ...*
- Systemwettbewerb mit PHEV und BEV



## Lkw

- **bisher kaum BZ-Aktivitäten der OEM**
- lediglich vereinzelte Erprobungsträger,  
z.B. *Renault Kangoo (Symbio Fuel Cell), Renault Maxity (Symbio Fuel Cell), Smith Newton (Proton Motors)*
- Tendenz: BZ-REX für BEV

## Stadtbusse

- **Flottentest** von Daimler Citaro Fuel Cell Hybrid in ST (vier) und KA (zwei)
- FCH-JU-Initiative von OEM & Kommunen, gemeinsame BZ-Busbeschaffung
- Preisreduktion auf 400 Tsd. € mittelfristig erwartet
- Daimler: BZ-Serienbus ab 2020
- Systemwettbewerb mit Batteriebusen



## Schienenfahrzeuge

- **Bisher keine BZ-Züge auf dem Markt**
- BZ-Triebzugentwicklung auf Basis Diesel-LINT durch Alstom;
  - Einsatz von zehn Triebzügen im SPNV BaWü ab 2021
- Weitere F&E-Aktivitäten weltweit / EU
- Potential auch für Rangier- & Baufahrzeuge

# BZ-Fahrzeugbestand und H<sub>2</sub>-Bedarf – Abschätzungen 2020/2030

Bestandsentwicklung abhängig von div. Faktoren – von steuerbar bis exogen

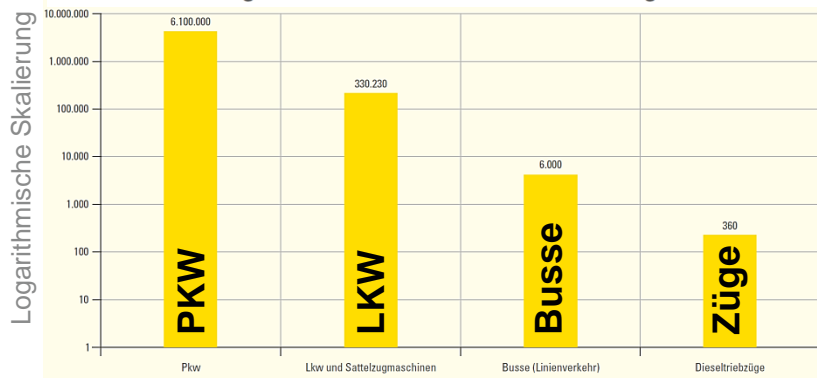
## ■ Formulierung zweier Szenarien:

- konservativ vs. ambitioniert

## ■ Basis der Abschätzungen:

- Pkw: bestehende DLR-Studien VECTOR21\*
- Busse, Lkw, Triebfzge.: neue Schätzungen

Gesamtfahrzeugbestand in Baden-Württemberg im Jahr 2014



\* U.a: Brokate et. al für MWV 2013

## Szenario konservativ vs. ambitioniert

### ■ Modellangebot / Akzeptanz

- zögerliche vs. deutliche Auffächerung der BZ-Fzg.-Modellpalette, Stückzahlenausweitung

### ■ Politischer / rechtlicher Rahmen

- Emissionsgesetzgebung
- Öffentliche Förderung / Ausschreibungsdesign

### ■ Kosten-/TCO-Entwicklung

- Wasserstoffpreis, Systemkosten BZ-Antrieb
- hoch vs. niedrig

### ■ Tankstelleninfrastruktur

- Ausbau schwach vs. stark, regionale Abdeckung

# Szenarioergebnisse - Fahrzeugbestand

## Ambitioniertes Szenario:

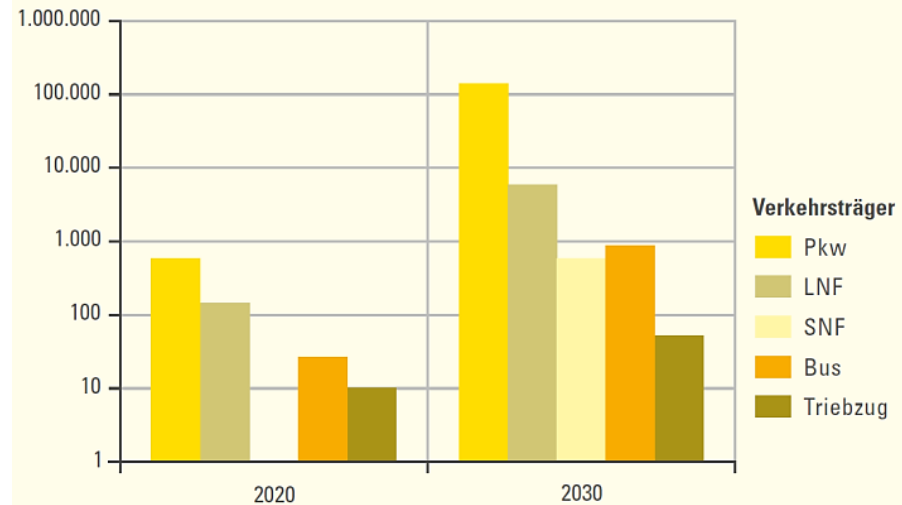
- bis 2020 nur wenige BZ-Fahrzeuge in BaWü
- 2020 bis 2030 beschleunigter Zuwachs auf:
  - **140.000 Pkw** (2,3 % der Gesamt-Pkw-Flotte),
  - 6.000 LNF** (2,5 %), **600 SNF** (0,7 %),
  - 900 Busse** (15 %), **50 Triebzüge** (25 %)
- SPNV-BZ-Triebzüge und BZ-Busse: geringe Stückzahlen, aber hohe Bestandsanteile
- Pkw dominiert
- Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) mit BZ-Antrieb spielen zunächst kaum eine Rolle

## Konservatives Szenario:

- BZ-Nischenmarkt auch 2030
- nur ~5.000 BZ-Fahrzeuge bis 2030

## Bestand BZ-Fahrzeuge in Baden-Württemberg

Ambitionierte Abschätzung



Logarithmische Skalierung



# Szenarioergebnisse - Wasserstoffbedarf

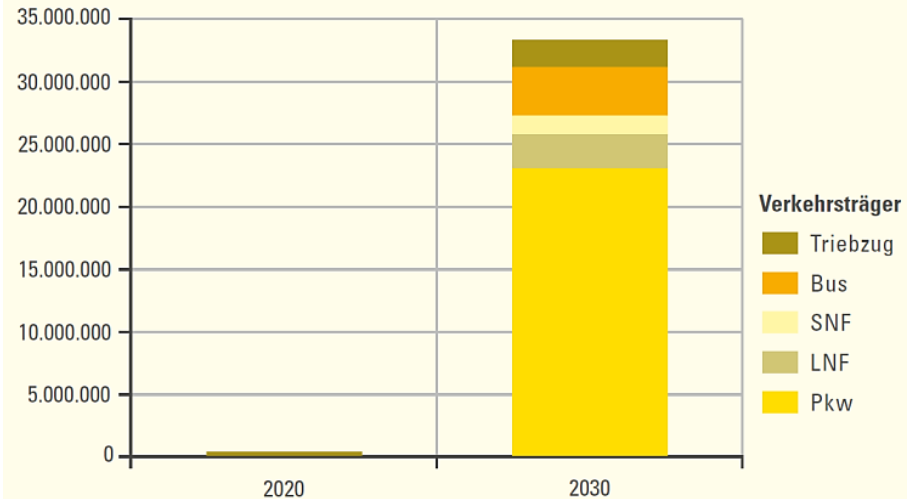
## Ambitioniertes Szenario:

- 2030: MIV dominiert  
verkehrlichen H<sub>2</sub>-Bedarf (70 %)
- Insg. 33.000 t H<sub>2</sub> im Jahr 2030

## Konservatives Szenario:

- Insg. 2.300 t H<sub>2</sub> im Jahr 2030

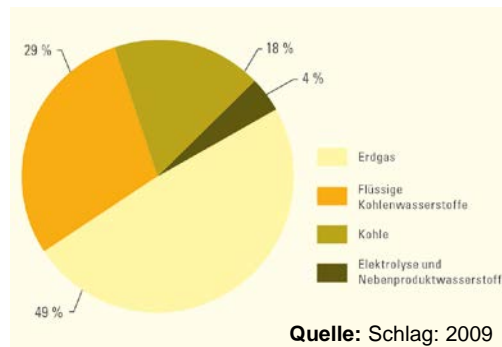
**H<sub>2</sub>-Bedarf in Baden-Württemberg gesamt (kg)**  
Ambitionierte Abschätzung



# Wasserstoff-Anwendungen in der Industrie und im Gasnetz

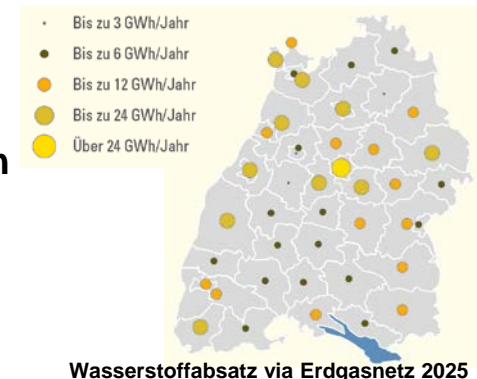
## Industrie

- Großindustrielle Herstellung von ca. 16.000 t/Jahr in BaWü
- Standortkonzentration (KA, WT, HB)
- **Strikte Kostenorientierung verhindert kurzfristige Wirtschaftlichkeit Elektrolyse-H<sub>2</sub>**



## Gasnetz

- PtG: Zumischung zum Erdgasnetz ( $\leq 2\text{vol}\%$ ) oder als CH<sub>4</sub> nach Methanisierung
- Theoretisches PtH<sub>2</sub>-Einspeisepotenzial ca. 12.000 t/Jahr (= 0,4 TWh/Jahr) mit regionalem Fokus auf Ballungsgebieten
- PtCH<sub>4</sub>-Anlagen auf Standorte mit biogener CO<sub>2</sub>-Verfügbarkeit eingeschränkt
- **Kurzfristig keine Wirtschaftlichkeit bei doppelten Gestehungskosten**



# Einsatz erneuerbaren Stromes zur Wasserstoff-Bereitstellung

Frieder Borggrefe  
Institut für Technische Thermodynamik  
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR)

**e-mobil BW GmbH**

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

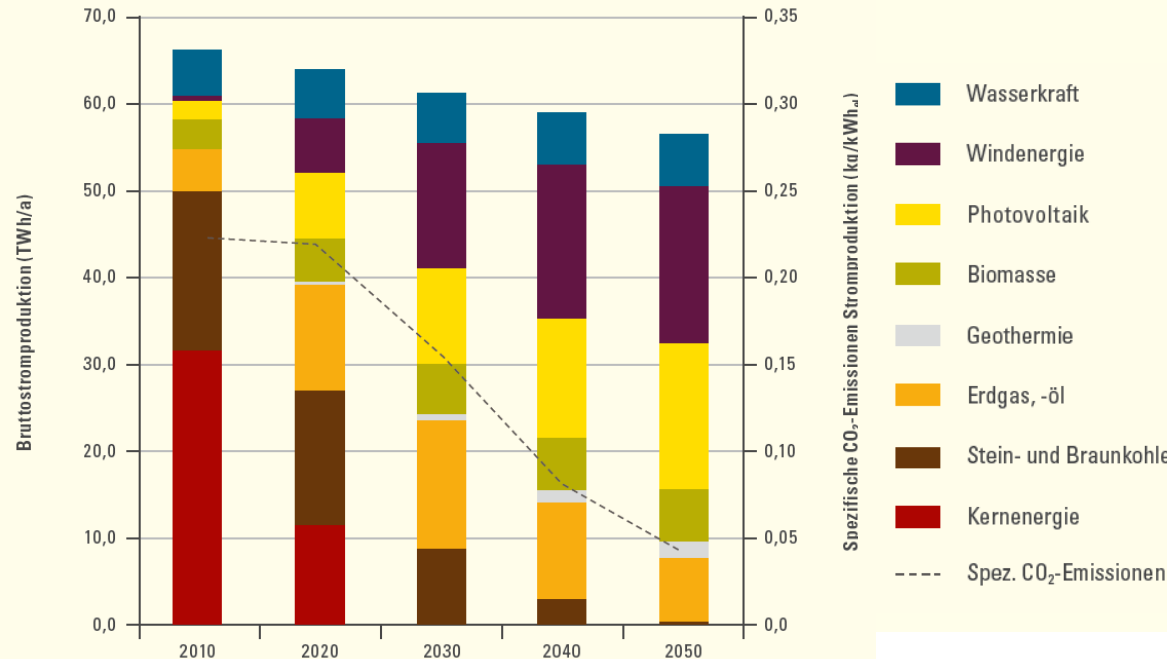
Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | [www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de)

# IEKK: Stromproduktion und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen in BW

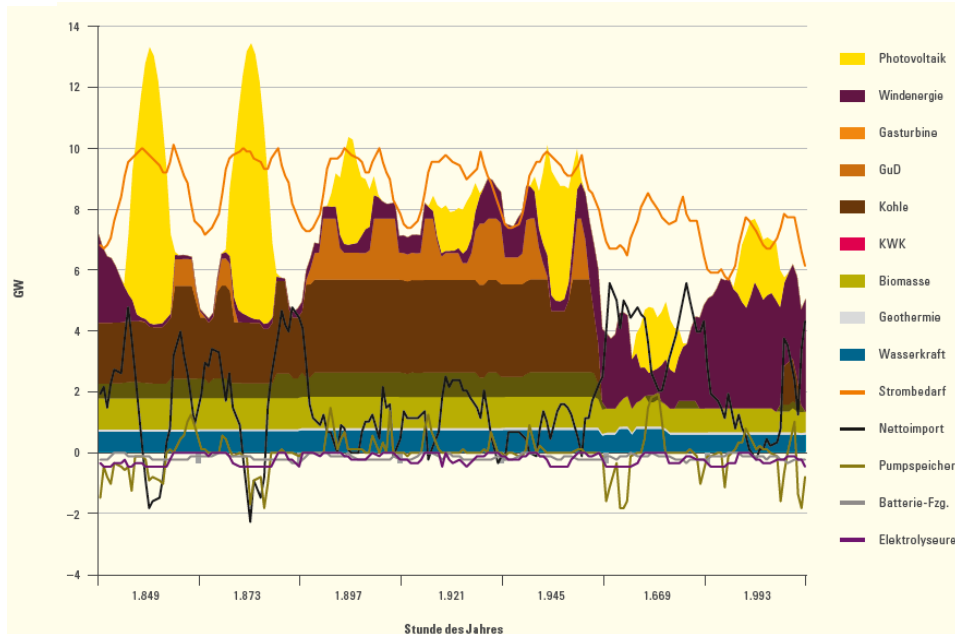
Bruttostromproduktion in BW und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen je kWh Strom



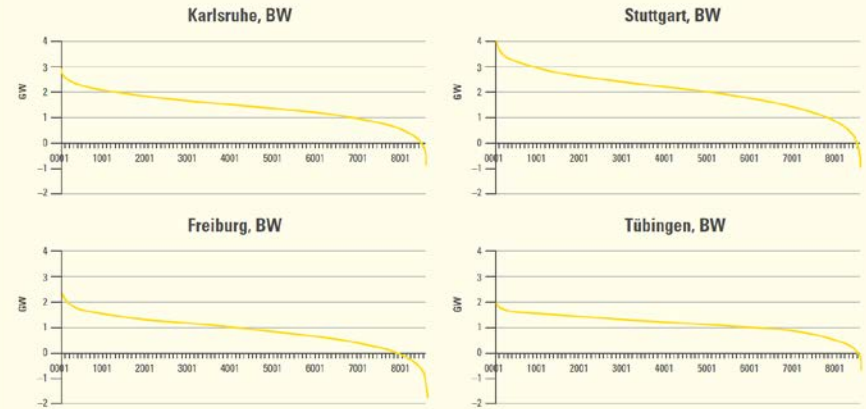
- Wie kann möglichst erneuerbarer Wasserstoff in Baden-Württemberg erzeugt werden?
- Inwiefern können dazu überschüssige Strommengen aus Wind- und PV-Anlagen genutzt werden?
- In welchem Umfang können Emissionen im Verkehrssektor bis 2030 durch H<sub>2</sub>-Mobilität gesenkt werden?

# BW: Überschussstrom kein Business-Modell für H<sub>2</sub>-Verstromung

Stromerzeugung Baden-Württemberg [GW]  
Ausgewählte Stunden



Residuallast [GW]  
(Jahresdauerlinien)



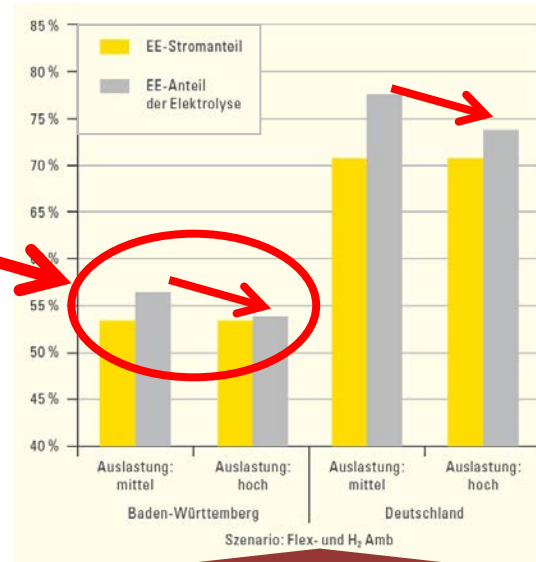
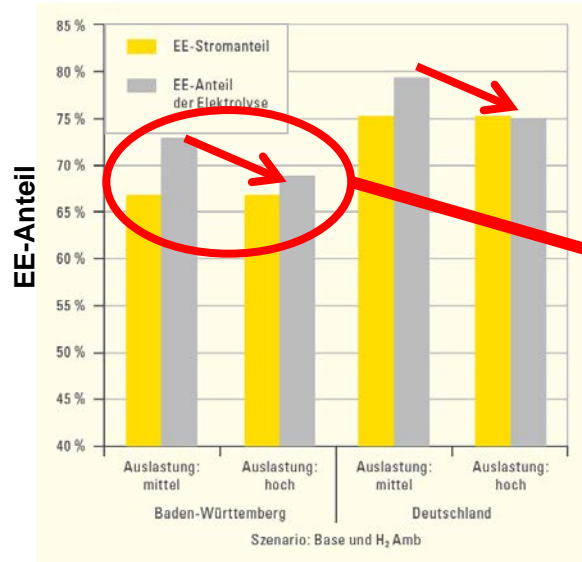
Wasserstoffbedarf gesamt  
Abgeregelter Strom in BW 2030 (ca.)  
EE-Erzeugung in BW 2030 (IEKK)  
Strombedarf in BW 2030 (IEKK)

3,8 TWh<sub>el</sub>  
2,9 TWh<sub>el</sub>  
37,6 TWh<sub>el</sub>  
74,7 TWh<sub>el</sub>

# Elektrolyseure: Anteil erneuerbarer Energien in Szenario Basis u. Flex-

Basis-Szenario

Geringe Flexibilitätsoptionen



Der Anteil erneuerbarer Energien ist abhängig von:

- der Konfiguration der Anlage
- Flexibilitätsoptionen im Stromsystem

Anlagendimensionierung/  
Ohne Nord-Süd Netzausbau  
-betrieb:  
Sinkt der EE-Stromanteil und  
Je weniger flexibel  
EE-Anteil der Elektrolyse  
(hohe Vollaststunden)  
in BW:  
desto geringer EE-Anteil  
in DE ebenfalls leicht



Reduzierter innerdeutscher Netzausbau  
(nur ein HGÜ-Korridor Nord-/Süd bis 2030).

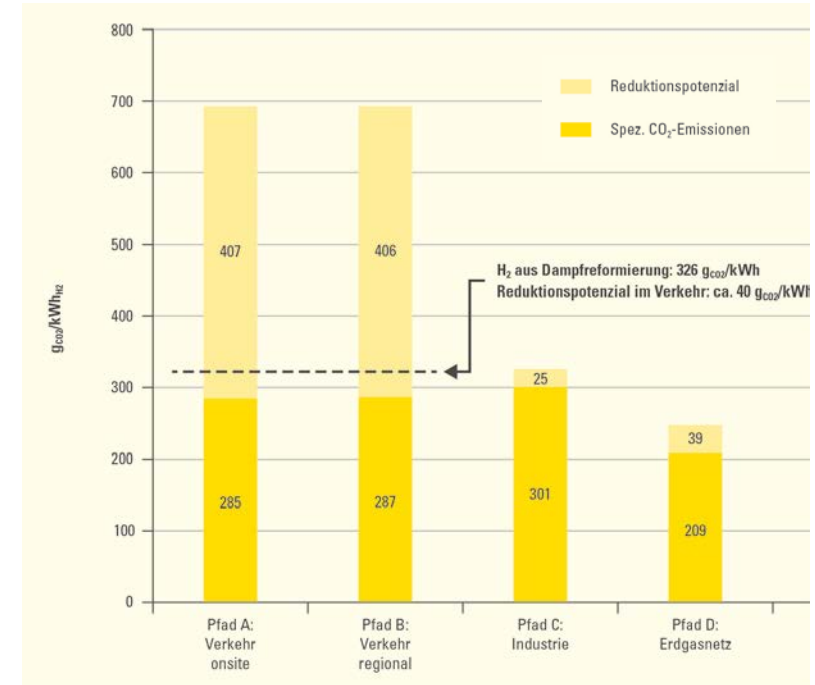


Reduzierte Flexibilität von Last, KWK, Elektromobilen  
(kein DSM, keine Ladesteuerung, KWK wärmegeführt)

# CO<sub>2</sub>-Emissionen – Großes Reduktionspotenzial im Verkehr

- Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen 209 – 301 g<sub>CO2</sub>/kWh ergeben sich aus Strommix 2030
- CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspotenzial hängt von CO<sub>2</sub>-Stromintensität und Wirkungsgrad der Elektrolyse ab
- Einsparungen im Verkehr > 400 g<sub>CO2</sub>/kWh, im Vergleich zu Wasserstoff aus Erdgas-Dampfreformierung aber nur 40 g<sub>CO2</sub>/kWh
- Einsparung für BaWü von ca. 200.000 ton<sub>CO2</sub>/Jahr ( $\triangleq$  1,4% aller Verkehrsemissionen BaWü), mit stark steigendem Minderungspotenzial

## Spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen der H<sub>2</sub>-Bereitstellung



# Wirtschaftlichkeitsaspekte

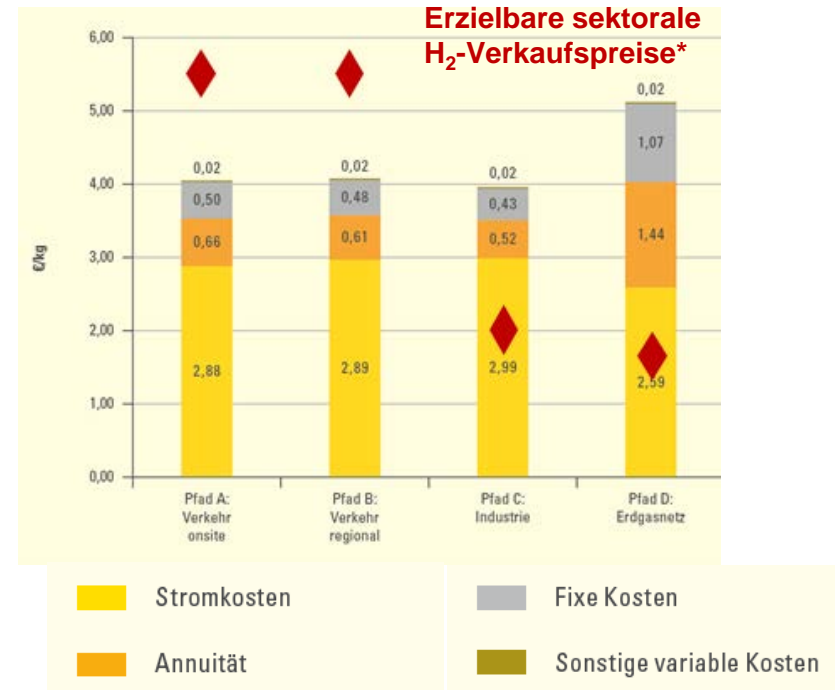
Dr. Ulrich Büniger  
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)



# Wirtschaftlichkeit – Positives Geschäftsmodell im Verkehr

- Simulation des Elektrolyse-H<sub>2</sub>-Speicher-Systems
  - H<sub>2</sub>-Kosten zwischen 4 - 5 €/kg:
  - 5 €/kg im Erdgassektor wegen höchster Nachfragefluktuation
  - Unterschiede begründet durch unterschiedliche Elektrolyseurauslastung und sektorale H<sub>2</sub>-Infrastrukturerfordernisse
  - Stromkosten haben größten Kostenanteil in allen untersuchten Anwendungen
- Unter gesetzten Rahmenbedingungen mittelfristig wirtschaftlich positives Geschäftsmodell nur im Verkehrssektor

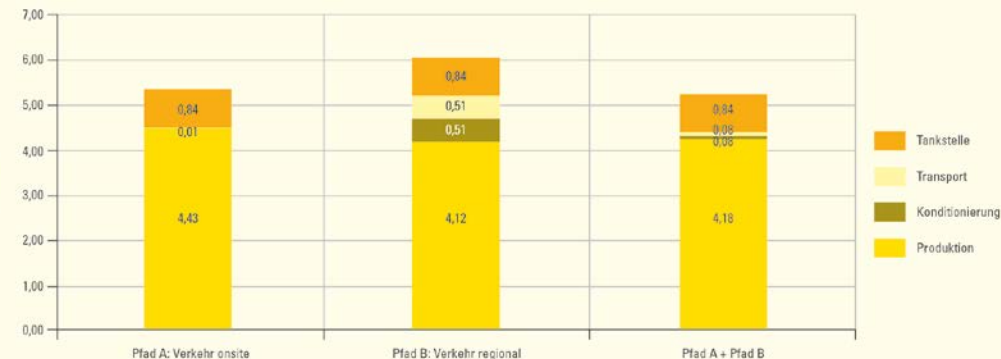
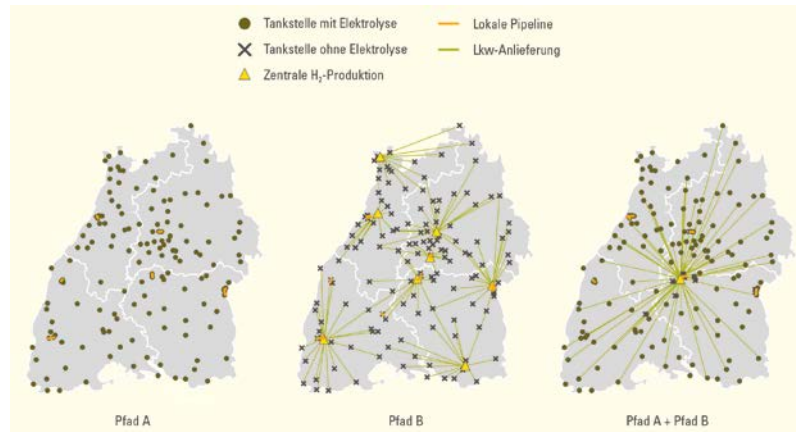
## Spez. Wasserstoffbereitstellungskosten



\* H<sub>2</sub>-Verkaufspreise für Industrie und Erdgasnetz aus PlanDelyKaD, 2015

# Betankungsinfrastruktur – Steigerung der H<sub>2</sub>-Kosten um 1-2 €/kg<sub>H2</sub>

- Elektrolysekapazität Baden-Württemberg ca. 250-300 MW<sub>el</sub> bis 2030
- Infrastruktur für Verkehrssektor und schlechte Auslastung der Elektrolyse steigern H<sub>2</sub>-Bereitstellungskosten um ca. 1-2 €/kg<sub>H2</sub> (Beitrag Tankstelle ca. 0,8 €/kg<sub>H2</sub>)
- Onsite Elektrolyse günstiger als regionale H<sub>2</sub>-Produktion mit Lkw-Anlieferung, Kombination dieser Pfade fördert Anlagenauslastung und verringert die Gesamtkosten
- Hohes Wertschöpfungspotenzial für Baden-Württemberg insbesondere im Anlagenbau erwartet



## Zusammenfassung und Ausblick

- Der **Verkehrssektor** ermöglicht durch den Einsatz von Brennstoffzellen die **früheste Kommerzialisierung** von Wasserstoff (Straßen- und Schienenverkehr)
- Bis **2030** könnte Wasserstoffmobilität Anteil von ca. **5% am Stromsektor** haben
- Andere Sektoren lassen wirtschaftliche Etablierung von H<sub>2</sub>-Energie bis 2030 nur in Nischen zu
- Systemdienstleistungen der Elektrolyseure ermöglichen, **mehr erneuerbaren Strom** zur Versorgung des Verkehrssektors in das Energiesystem zu integrieren
- Einsatz von Wasserstoff im Verkehr leistet **wesentlichen Beitrag** zur Decarbonisierung des Verkehrssektors **nach 2030** (bis 2030 ca. 200.000 t/Jahr in BW)
- Herausforderung: Geschickte Vernetzung Verkehrs- und Energiesektor
- Handlungsempfehlungen, u.a.
  - Implementierungsplan, Ausbau der erneuerbaren Energien, Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur

### Autoren

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH:

Dr. Uwe Albrecht, Dr. Ulrich Bünger, Jan Michalski, Werner Weindorf, Jan Zerhusen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Technische Thermodynamik:

Frieder Borggrefe, Dr. Hans Christian Gils, Dr. Thomas Pregger

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte:

Florian Kleiner, Johannes Pagenkopf, Dr. Stephan Schmid

Download der Studie unter <http://www.e-mobilbw.de>

#### e-mobil BW GmbH

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | [www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de)